

大跨度悬索式管桥静动态分析

邓翊华

(胜利勘察设计研究院)

邓翊华. 大跨度悬索式管桥静动态分析. 油气储运, 2010, 29(5): 342-345.

摘要:基于某大跨度悬索式管桥设计方案,根据其结构特点,应用 ANSYS 分析软件建立了三维有限元模型,对模型进行了静力、模态和风振反应的有限元分析。静力计算结果表明,悬索管桥各构件均处于较低的应力状态;通过模态分析获得了悬索管桥结构的前 20 阶固有频率;风振动态分析结果表明,悬索管桥结构位移响应曲线与各个时刻输入的风荷载数据趋势类同,主索上的应力响应峰值较小,管桥的应力响应峰值明显增大。

关键词:悬索式管桥;有限元;静态分析;模态分析;风振反应

在长输管道工程施工中,当遇到河流、山谷等自然障碍物或人工构筑物时,常采用跨越结构辅助敷设管道。对于超过 100 m 的大型管道跨越,应首选悬索式管桥结构。

方式建立有限元模型,完成有限元分析计算。

1 有限元模型的建立

1.1 结构组成

悬索式管桥主要由塔架、主索、抗风索、吊索、风系索、锚固系统及梁式管桥等部分组成。悬索式管桥采用两根钢丝绳作为承重主索,主索由两个塔架支撑,边跨索和抗风索端部固定于锚固墩。管桥方向按 5 m 间距设吊架,吊架两侧对称设有吊索和风系索,桥身通过吊架与吊索、风系索连接,设计时可考虑起拱。

1.2 有限元模型

悬索管桥管道采用管单元 PIPE16,塔架与管桥采用三维梁单元 BEAM188 离散,管道与管桥主梁采取同一节点,安装在悬索跨越整体结构中,与管桥产生的偏移自由度保持一致。主索和斜拉索主要承受拉伸载荷,采用单压或单拉的杆单元 LINK10,杆单元与梁单元用梁单元的自然节点进行连接(图 1~图 4)。根据管桥的实际固定方式,对有限元模型施加约束,管道与主索的两端和塔架底部均采用固定约束。管桥的有限元分析采用 ANSYS 通用有限元软件,通过界面操作与编制命令流文件相结合的



图 1 悬索式管桥的有限元整体模型

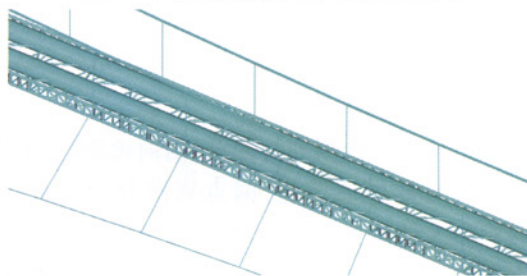


图 2 管桥、吊索、风系索连接局部放大图

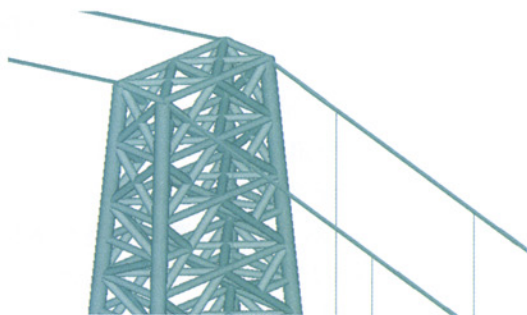


图 3 塔架与主索连接局部放大图

作者简介:邓翊华,助理工程师,1982年生,2009年硕士毕业于中国石油大学(华东)工程力学专业,现主要从事油气管道穿跨越工程的设计和
研究工作。电话:0546-7807530。E-mail:dengyihua82@126.com

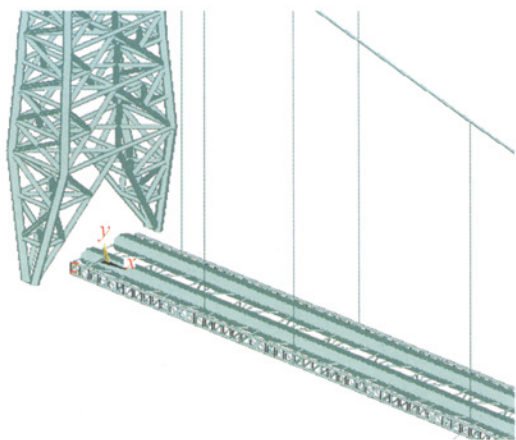


图4 悬索式管桥端部局部放大图

1.3 模拟管桥基本参数

国内某悬索式管桥总长 376.37 m, 主跨 240 m, 边跨分别为 91.10 m 和 45.63 m, 桥面宽约 3.7 m, 塔架高 29.7 m。主索矢高 23 m, 边跨索和抗风索端部固定于锚固墩。

管桥方向按 5 m 间距设吊架, 设计时起拱 2 m, 吊架两侧对称设有一根吊索和一根风系索, 桥身通过吊架与吊索、风系索连接。输气管道管径为 $1\ 016 \times 21$ mm, 最高输送压力为 10 MPa, 最高工作温度为 30℃。主索采用热拉挤聚乙烯拉索 pes5-499, 抗风索采用热拉挤聚乙烯拉索 pes5-55, 风系索、吊索均采用 $\phi 22$ mm 的钢芯钢丝绳, 主塔采用格构式钢塔架, 主杆和腹杆均为钢管, 塔架底部与主塔基础铰接, 腹杆结构采用“K”型结构。塔架立杆采用 Q345 无缝钢管, $\phi 426 \times 12$ mm, 主腹杆采用 Q345 无缝钢管, $\phi 273 \times 10$ mm。桥面铺设巡检维修人行通道, 参考温度为 0℃, 温差 ± 30 ℃。

模型中主索的初始应变 ϵ 为 1.3×10^{-3} , 相当于预应力为 273 MPa; 左边索的初始应变 ϵ 为 1.56×10^{-3} , 相当于预应力为 328 MPa; 右边索的初始应变 ϵ 为 1.6×10^{-3} , 相当于预应力为 336 MPa。风荷载根据当地情况采用百年一遇基本风压 350 N/m²。

风荷载简化为与管道相垂直的横向风, 考虑风振系数、风荷载体型系数、风压高度变化系数, 最后静力等效为管道受风力一侧的标准风压值 0.640 kN/m², 均匀作用在管桥上。

2 静态分析

2.1 找形计算

索结构在荷载作用下处于小应变、大位移状态, 对这一类柔性结构的有限元计算需要考虑其几何非线性特点, 其形状、外部荷载及内部应力以非线性方式的相互作用满足平衡方程。为使索结构具有一定的刚度, 必须对其施加预应力, 进行找形分析, 以确定初始平衡形态, 这是索结构设计分析中的关键步骤。

有限元找形法的基本算法有两种^[1]: 从初始几何开始迭代和从平面状态开始迭代。本研究使用前者, 从一个勾画出的初始几何开始, 通过改变索的预应力或索段的原始长度并经迭代得到相应的形状, 经过两次求解后达到理想的结果。

2.2 静力分析

通过找形计算, 确定了满足控制点的边界条件和初应力分布后, 进一步进行静力分析。在静力求解器中选择 NLGEOM(大变形影响)和 SSTIF(应力刚化)项。采用通用后处理程序 POST1 的 PLOT(图形显示)和 LIST(数据列表)观察器观察计算结果, 提取所需计算结果, 并根据实际结构判断结果的可靠性。

2.3 计算结果

有限元计算时对主索和斜拉索均施加了预应力。计算时, 索中的预应力通过对索施加初始应变的方式得到(表 1)。作用温度分别为 30℃ 和 -30℃, 试压分别在单管满载和双管满载的条件下进行。

表 1 悬索管桥的静力计算结果

作用条件	主索应力 /MPa	最大应力 /MPa					最大位移 /mm	
		管道	吊索	抗风索	风系索	管桥	管桥	结构
自重	327	197	130	166	27.4	59.7	92.6	118.7
自重、风荷载	327	197	130	272	40.5	64.7	292.3	337.1
自重、温度	320/334	197	126/135	97/240	16.6/38.3	93.9/101.0	346.2/163.2	346.2/282.6
自重、温度、风荷载	320/334	197	127/135	182/272	29.8/50.9	97.6/64.7	443.6/322.3	443.6/429.8
试压	456/554		168/208	244/182	23.8/15.5	149.0/222.0	571.4/977.0	573.0/977.4

通过对比分析,以只受重力作用为基础,有限元模型中主索是主要的承重结构,其通过吊索直接承受跨越管段的重力,再集中传递给两端的塔架和锚固构件。抗风索自重、风系索和管桥受风荷载所引起的偏移和管桥竖向变形对其位置曲线及空间刚度影响都很大。抗风索、吊索、风系索一直处于较低的应力状态。除了在试压条件下,管桥也一直处于较低的应力状态。管桥设计时起拱 2 m,在一定程度抵消了压力,使得管桥基本不承受力的作用。有限元模型在各种工况下都能安全运行,在试压下主要构件达到最大应力状态。悬索管桥具有明显的几何非线性特征,质量轻、阻尼低,对风荷载十分敏感。另外,温度对整个结构的影响也很大。

3 模态分析

3.1 特征方程

模态分析是为了确定结构的振动特性(固有频率和模态形状),也是进行瞬态动力分析、谐响应分析和谱分析的基础。典型无阻尼模态分析求解的基本方程是经典的特征值求解问题^[2]:

$$[K]\{\varphi_i\} = \omega_i^2[M]\{\varphi_i\} \quad (1)$$

式中:[K]为刚度矩阵; $\{\varphi_i\}$ 为第*i*阶模态的振型向量(特征向量); ω_i 为第*i*阶模态的固有频率(ω_i^2 是特征值),Hz;[M]为质量矩阵。

在模态分析中,特征方程未考虑阻尼的影响;特征值和特征向量的提取方法采用 Block Lanczos 法。

3.2 计算结果

在实际工程施工中,主索和斜拉索都需施加预应力以保证结构体系初始状态的整体性和稳定性,在有限元模态分析中同样考虑了预应力效应。采用 Lanczos 算法提取悬索式管桥前 20 阶固有频率(表 2),并扩展其前 20 阶模态,以观察悬索式管桥的模态振型,计算结构自振频率。

悬索式管桥是一种低频率的振动结构,这主要是由其跨度大、柔韧性好以及阻尼低的特点决定的。根据悬索式管桥显示的各阶振型,在低频振动时,其振型主要表现为管道的竖向弯曲振动;随着振动频率的提高,悬索式管桥的振型表现为管道的横向弯曲振动;在较高的固有频率范围内振动时,悬索式管桥的振型不但表现为管道的竖向弯曲振动,而且还伴随有扭转振动。可见,外界激振频率不同,悬索式

管桥模态振型响应也不同。

表 2 悬索管桥前 20 阶固有频率

模态阶数	频率 /Hz	模态阶数	频率 /Hz
1	1.181 6	11	3.182 4
2	1.212 5	12	3.619 1
3	1.415 5	13	3.743 4
4	1.430 0	14	4.225 7
5	1.662 1	15	4.323 7
6	1.929 0	16	4.430 5
7	1.982 8	17	4.583 6
8	2.236 2	18	4.613 4
9	2.820 0	19	4.802 9
10	2.886 3	20	4.961 5

4 动态分析

4.1 分析方法

悬索式管桥属细长柔性结构,其基频为 1.181 6 Hz,对风载荷的作用非常敏感,易产生风振响应。复杂结构的风振响应分析和风振系数的求解主要有 4 种方法:频域分析法、时域分析法、风洞试验法和数值风洞技术^[3]。对于悬索结构等大跨度空间结构,风作用导致的结构响应改变风荷载动力模式,而风荷载动力模式变化反过来又影响结构响应,气流与结构的耦合作用,使得风荷载不能分解成平均风和脉动风的形式,从而大大增加了问题的复杂性,因此风致振动最好以实测数据为准。由于不具备实测条件,风荷载取为横桥向全面积作用的常振幅正弦力,并假设整个结构上每一点的风荷载都是同相位的。

瞬态分析中的模态叠加法是通过模态分析得到振型,再乘以参与因子并求和来计算结构响应。理论上,对于*n*个自由度的系统,可以通过方程解耦确定模态坐标响应,通过坐标变换得到物理坐标响应。

*n*个自由度系统的任何振动形式都可以表示成*n*阶主振型的线性组合^[4]:

$$\{x\} = \sum_{i=1}^n \xi_i \{\varphi_i\} \quad (2)$$

将其表示成矩阵的形式:

$$\{x\} = [\Phi]\{\xi\} \quad (3)$$

式中: $\{x\}$ 为节点物理坐标; $\{\varphi_i\}$ 为第*i*阶模态;[Φ]为模态矩阵; ξ_i 为各阶主模态的参与因子(加权

因子)。

4.2 风振反应分析结果

风力方向垂直于主梁,且平行于桥面,最大风压取为 350 N/m^2 ,比较等效静态风荷载,在桁架 ($z=1.85$)所有节点平均受力 $F=212 \text{ N}$,在桁架 ($z=0.925$)所有节点平均受力 $F=1576 \text{ N}$,在桁架 ($z=0.925$)所有节点平均受力 $F=764 \text{ N}$,方向均沿 z 方向(向内),取 $150+132\sin(1.5t)$ 、 $1\ 000+576\sin(1.5t)$ 、 $500+264\sin(1.5t)$ 从 0 s 到 5.0 s ,时间间隔 0.1 s ,分析风振反应(图5~图8)。

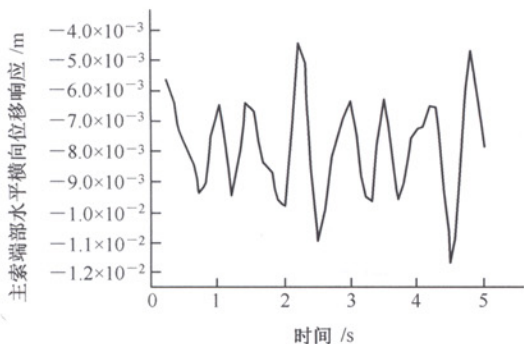


图5 主索端部节点水平横向位移响应

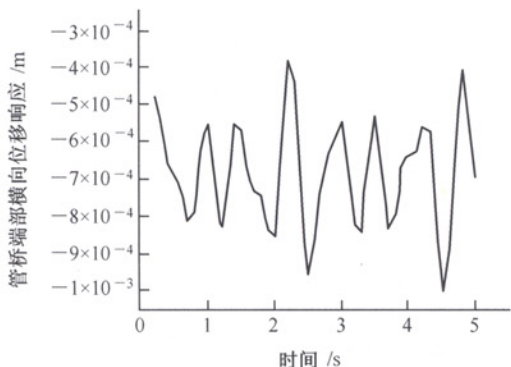


图6 管桥端部节点水平横向位移响应

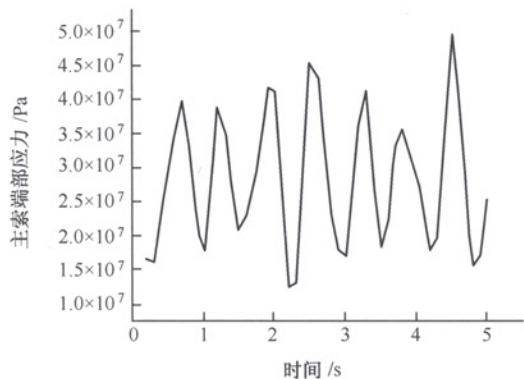


图7 主索端部节点拉应力变化

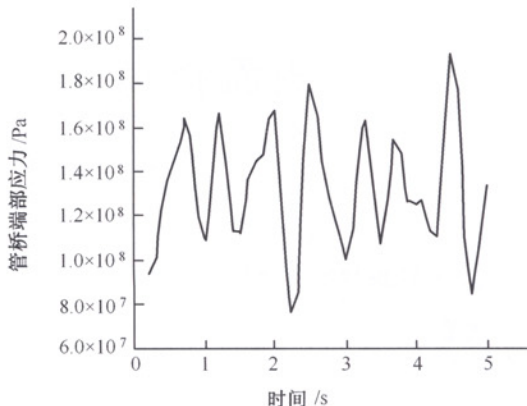


图8 管桥端部节点应力变化

随着各个时刻输入风荷载数据的不同,整个结构做相应的位移响应,响应曲线与输入的风荷载数据趋势类同。主索的应力响应峰值与静态结果相比变化显著,但相比实际情况,该响应峰值相对较小,需进一步探索。管桥结构的位移与主索相似,但应力响应峰值明显增大,已超过应力屈服强度,应给予重视。

参考文献:

- [1] 张明,张海宾.索杆梁膜结构找形方法研究[J].山西建筑,2008,34(17):89-91.
- [2] 滕振超.跨越管道地震响应分析及基于性能的抗震设计[D].大庆:大庆石油学院,2003:1-65.
- [3] 王世圣,张宏.大跨度悬索式管桥风振响应分析[J].油气储运,2003,22(1):27-29.
- [4] 潘利剑,张博明,戴福洪.简谐激励下共固化复合材料粘弹阻尼结构的损耗因子研究[J].振动与冲击,2008,27(2):57-60.

(收稿日期:2009-02-16)